

Optimal sizing and control of hybrid electric vehicles

Doctoral Thesis

Author(s):

Ebbesen, Søren

Publication date:

2012

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007580109>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 20478

OPTIMAL SIZING AND CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLES

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Søren Bruhn Ebbesen

MSc ETH in Mechanical Engineering
born September 22, 1979
citizen of Denmark

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Lino Guzzella, examiner
Prof. Dr. Maarten Steinbuch, co-examiner
Dr. Rüdiger Steiner, co-examiner

2012

Abstract

The goal of this thesis is to develop a unified framework for optimal sizing and control of hybrid electric drivetrains. In this context, *sizing* refers to the choice of engine displacement volume, maximum electric machine power, and battery energy capacity. Moreover, *control* relates to the energy management problem, i.e., the decision of how to split the instantaneous power demanded by the driver between the fossil fuel path (engine and fuel tank) and the electric path (electric machine and battery). Finally, *optimal* refers to the choice of component sizing and control that when combined globally maximizes or minimizes certain objective functions such as fuel economy and (or) battery aging while respecting all constraints imposed on the system. While the material presented herein is focused on the so-called full parallel hybrid electric drivetrain, the framework is generic and thus not limited to a specific topology.

The framework is build around two distinct yet integrated instances of optimization: an outer loop which is concerned with the sizing part of the problem, i.e., picking out combinations of engine, electric machine, and battery sizing that may improve the objective function value(s); and an inner loop which derives the optimal control strategy for the current choice of component sizing chosen by the outer loop. While the inner loop employs global optimization techniques in order to derive the fuel optimal control strategy, the full potential of each and every candidate chosen by the outer loop is realized. In this way, the control strategy does not influence the sizing problem. While the inner loop relies exclusively on dynamic programming, different numerical search algorithms for the outer loop were investigated. In turn, amongst the algorithms under consideration, particle swarm optimization (PSO) was found to be the best choice for solving this particular optimization problem.

Typically, the drivetrain component contributing most significantly to the overall cost of the system is the electric energy storage system, in this con-

text, the battery. Thus, both the OEM and the customers alike have an interest in choosing the smallest possible battery and utilizing it in such way that it lasts for the entire target life of the vehicle without replacements. Of course, smaller batteries and restricted usage in order to limit battery aging generally have a negative impact on fuel economy giving rise to a trade-off between the two. Thus, in the second part of this thesis, the sizing and control problem under consideration of battery aging is investigated. This study necessitated the development of a control oriented battery aging model (Li-ion). In addition, a causal battery state-of-health perceptive energy management strategy is presented. This strategy is similar to the well-known equivalent consumption minimization strategy. The results show that overall cost of ownership can be significantly reduced by adopting the proposed battery aging perceptive strategy.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer vereinheitlichten Vorgehensweise für die Grössenermittlung und die Regelung von hybrid-elektrischen Antriebssträngen. Hierbei bezieht sich Grössenermittlung auf die Wahl des Hubraums des Verbrennungsmotors, der maximalen elektrischen Leistung der E-Maschine und der Energiekapazität der Batterie. Des Weiteren bezieht sich Regelung auf das Problem der Energieverwaltung, d.h. die Entscheidung wie die momentan vom Fahrer angeforderte Leistung auf den verbrennungsmotorischen Pfad (Verbrennungsmotor und Kraftstofftank) und den elektrischen Pfad (E-Maschine und Batterie) aufgeteilt wird. Zum Abschluss bezieht sich optimal auf die Wahl der Grösse der jeweiligen Komponenten und der Regelstrategie welche zusammen gewisse Gütekriterien (z.B. Kraftstoffverbrauch und/oder Batterialterung) unter Einhaltung aller Einschränkungen, die auf das System wirken, global minimieren oder maximieren. Während die hier gezeigte Arbeit sich auf den sogenannten voll, parallel, hybrid-elektrischen Antriebsstrang konzentriert, ist die Vorgehensweise allgemein und nicht auf eine bestimmte Struktur beschränkt.

Die Vorgehensweise baut auf zwei verschiedene jedoch miteinander verknüpfte Optimierungen auf: ein äusserer Kreis der sich um das Problem der Grössenermittlung kümmert, d.h. die Auswahl von Kombinationen aus Grössen von Verbrennungsmotor, E-Maschine und Batterie welche den Wert der Gütekriterien verbessern könnte; und ein innerer Kreis welcher die optimale Regelstrategie für die derzeitige Auswahl an Komponenten-grössen des äusseren Kreises bestimmt. Da der innere Kreis globale Optimierungstechniken zum Finden der kraftstoffoptimalen Betriebsstrategie anwendet, wird das volle Potential jedes vom äusseren Kreis ausgewählten Kandidaten ausgeschöpft. Dadurch hat die Regelstrategie keinen Einfluss auf das Problem der Grössenermittlung. Während der innere Kreis ausschliesslich Dynamic Programming einsetzt, wurden für den äusseren Kreis verschiedene numerische Algorithmen untersucht. Von den in Erwägung

gezogenen Algorithmen hat sich Particle Swarm Optimization (PSO) als am besten geeignet zur Lösung dieses spezifischen Optimierungsproblems erwiesen.

Normalerweise ist die Komponente des Antriebsstrangs welche den Grössten Anteil an den Gesamtkosten trägt der elektrische Energiespeicher, in diesem Fall die Batterie. Dementsprechend haben sowohl der Hersteller als auch der Kunde ein Interesse daran eine kleinstmögliche Batterie einzusetzen und sie so zu betreiben, dass sie ohne Austausch über die komplette avisierte Lebensdauer des Fahrzeugs eingesetzt werden kann. Selbstverständlich haben kleinere Batterien und eingeschränkte Nutzung zur Beschränkung der Batteriealterung einen negativen Effekt auf den Kraftstoffverbrauch. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt. Demzufolge wird im zweiten Teil dieser Arbeit die Grössenbestimmung und Regelung unter Einbezug der Batteriealterung untersucht. Diese Studie macht die Entwicklung eines regelungstechnisch orientierten Modells der Alterung von Lithium-Ionen Batterien erforderlich. Zusätzlich wird eine kausale, den Alterungszustand der Batterie einbeziehende Energieverwaltungsstrategie vorgestellt. Diese Strategie ähnelt der weitläufig bekannten "equivalent consumption minimization strategy". Die Resultate zeigen, dass die Anschaffungs- und Betriebskosten durch die Anwendung der batteriealterungsabhängigen Strategie massgeblich reduziert werden können.